

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 10 日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2009～2013

課題番号：21224007

研究課題名(和文) 新世代超冷中性子源による時間反転不変性の検証

研究課題名(英文) Time reversal symmetry violation test with new generation ultra cold neutrons

研究代表者

増田 康博 (Masuda, Yasuhiro)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・特別准教授

研究者番号：60150009

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 162,900,000円、(間接経費) 48,870,000円

研究成果の概要(和文)：超流動ヘリウム(He-II)を用いた新世代超冷中性子(UCN)源を完成させ、大阪大学核物理研究センター(RCNP)の陽子ビームを用いてUCNを生成し、He-II容器のアルミ箔窓に3.5Tの磁場をかけて、UCNの取出しと偏極に成功した。そして、中性子電気双極子能率(EDM)測定装置を完成させた。完成した新UCN源は、大阪大学核物理研究センターの陽子ビーム強度が予定通り10倍になれば、直ちに世界最強のUCN源となり、EDM測定の統計誤差は $10^{-26}$  e cm以下になる。幾何学的位相効果(GPE)の研究を行い、系統誤差を $10^{-27}$  e cmにする方法を見出した。

研究成果の概要(英文)：A new generation UCN source of He-II and an apparatus for neutron EDM measurement have been constructed. UCN have been produced by means of an RCNP proton beam. UCN were successfully extracted through an aluminum window at the He-II bottle, where a 3.5 T magnetic field was applied. UCN were polarized upon the extraction. This UCN source reduces the statistical error lower than  $10^{-26}$  e cm, when RCNP proton beam power is increased by a factor 10. The geometric phase effect has been studied so that the systematic error becomes lower than  $10^{-27}$  e cm.

研究分野：原子核素粒子物理

科研費の分科・細目：物理学・素粒子、原子核、宇宙線、宇宙物理

キーワード：超冷中性子 時間反転対称性

1. 研究開始当初の背景

我々が存在する宇宙には、物質のみが存在し、反物質は見つかっていない。これは、サハロフによると CP 非保存が一因している。素粒子の標準理論は、K そして B 中間子崩壊における CP 非保存を説明できるが、この宇宙における物質の存在を説明できない。また、素粒子の階層性の問題を解決できず、重力を理論の中に取り込めない。これらの問題を解決するため、標準理論を超える様々な理論が提唱されてきた。EDM を使えば、これら新物理を検証できる。

2. 研究の目的

標準理論を超える新物理による EDM の予言値は、 $10^{-25} \sim 10^{-28}$  e cm である。これまで、ILL(仏) の UCN 実験が最も精度の高い実験と言われて来た。この ILL 実験では、UCN 密度  $0.7$  UCN/cm<sup>3</sup> で、EDM 上限値  $3 \times 10^{-26}$  e cm が得られている。今回の実験研究は、新しい UCN 源と新しい EDM 測定法により、 $10^{-26}$  e cm 以下の EDM 測定を行い、標準理論を超える様々な理論を検証しようとするものである。

3. 研究の方法

EDM 測定のみならず、UCN 物理の発展には UCN 密度増強が決め手となる。従来型 UCN 源では、位相空間密度不変という Liouville の定理により、UCN 密度が制限されていた。本研究では、Liouville の定理による限界を打ち破るため、冷中性子を超流動ヘリウム(He-II)フォノンを用いて冷却し、高密度 UCN を発生させる。つまり、フォノンの位相空間を用いて、Liouville の定理による限界を打ち破る。また、より高い冷中性子強度が得られるように、図 1 に示すようにスパレーション中性子源内に He-II を設置する。

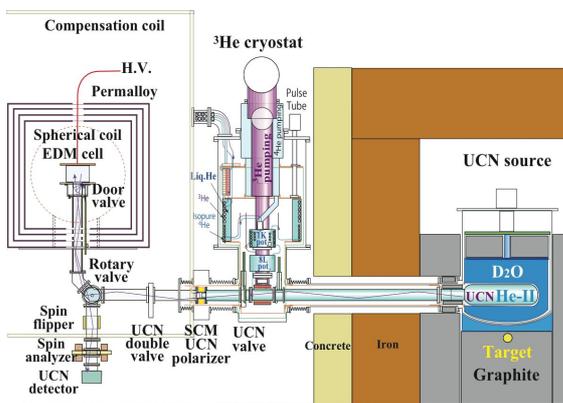


図 1 He-II UCN 源による nEDM 測定

物質中のフォノンを用いる新しい UCN 源は、原子炉や大強度陽子加速器を持つ世界の主要研究機関で、最優先で開発されている。その中で、我々の UCN 源は世界最強となるものである。Los Alamos(米)や PSI(スイス)は、スパレーション中性子源内に固体重水素(SD2)を設置して UCN 源の建設を行

っている。そして、相次いで UCN の発生に成功した。UCN 源内で得られる UCN 数は、UCN 生成率と UCN 寿命の積で決まる。UCN 数は、冷中性子照射時間に比例して増大するが、この増大は UCN の寿命で飽和する。SD2内では、He-II 内より UCN の寿命が短い。ILL や Oakridge(米)は、冷中性子ビームライン上に He-II を設置し、UCN を発生している。冷中性子ビームラインの中では、冷中性子束は、スパレーション中性子源内に比べて低くなり、UCN 生成率は下がってしまう。

He-II 内で発生する UCN は、円筒型 EDM 測定容器に送られ、EDM 測定が行われる。測定容器に導く前に、UCN のスピンを超伝導マグネットの磁場で偏極し、測定容器の中に閉じ込める。円筒の両端に電場をかけ、円筒軸の方向に球面コイルを用いて軸対称磁場をかける。図 2 に示すように、Ramsey 共鳴での最初の 90 度高周波(RF)磁場で、静磁場方向に揃った UCN スピンを RF 磁場の周りに 90 度回転させる。その後、UCN スピンは静磁場と電場の周りを才差運動する。最初の 90 度 RF 磁場の位相に同期する 2 番目の 90 度 RF 磁場をかけると、UCN スピンの才差運動の位相が静磁場に対する射影角に変換される。その後、UCN を純鉄磁化フォイルに導く。純鉄磁化フォイルを透過する UCN の数は、磁場方向の UCN スピン成分に依存するので、静磁場に対する射影角、つまり、才差運動の位相が測定される。そして、才差運動の電場依存項から EDM を求める。

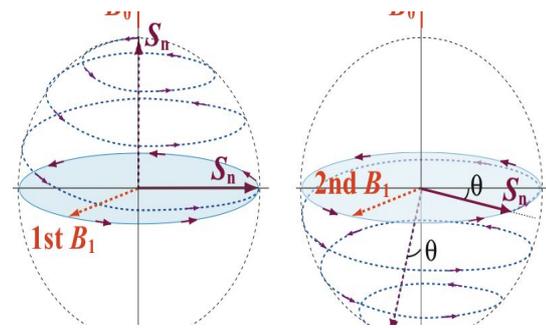


図 2 Ramsey 共鳴

統計精度は UCN 計数に依存し、測定容器の体積と UCN 密度で決まる。

4. 研究成果

UCN 密度は、He-II 内での UCN 生成率と容器内での UCN 寿命、そして He-II からの UCN 取出し効率にも比例する。UCN 生成率は冷中性子束に比例し、冷中性子束は陽子ビーム電流に比例するが、UCN 寿命は、ビーム照射に伴う He-II の温度上昇により、短くなって行く。1μA の陽子ビームを既存の垂直型 UCN 源に照射し、温度上昇を測定するとともに UCN 寿命と UCN 密度を測定した。UCN 寿命は 81 s で、UCN 密度は、UCN エネルギーの最大値は  $E_c = 90$

neV で、世界最高値  $26 \text{ UCN/cm}^3$  を得た。次に、He-II 容器に熱負荷をかけて温度上昇を測定した。その結果、陽子ビーム電流を  $5 \mu\text{A}$  にできると判明した。Phys. Rev. Lett. に出版した。

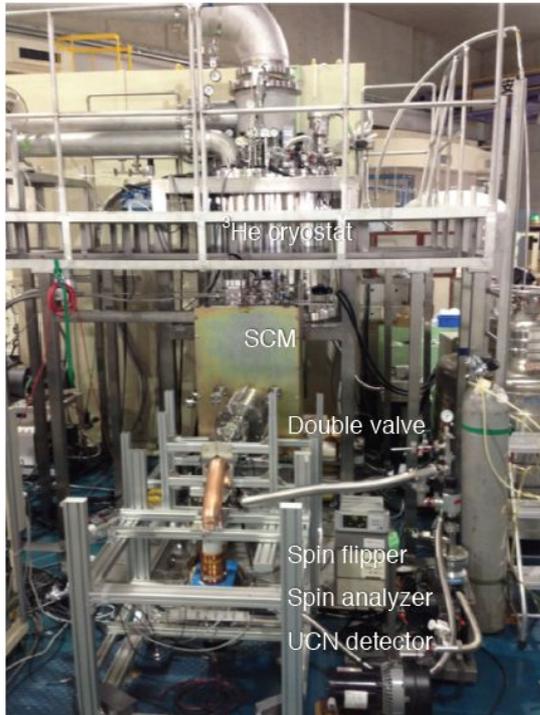


図3 第2世代 UCN 源と超伝導マグネットからの偏極 UCN の測定

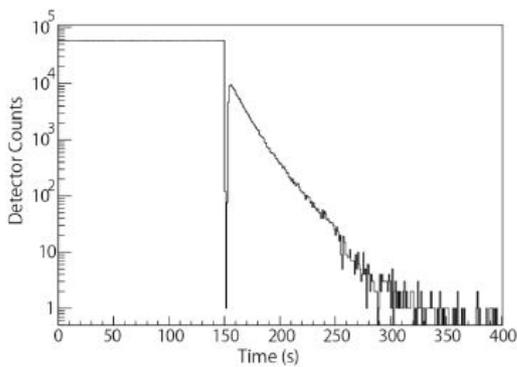


図4 第2世代 UCN 源からの UCN 計数

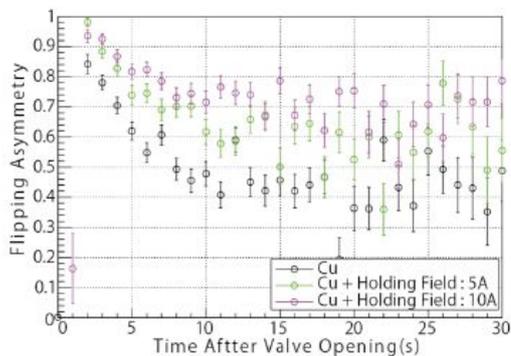


図5 UCN 偏極

He-II から EDM 容器への移送効率を上げるため、つまり、EDM 容器内での UCN 密度を上げるため、垂直型 UCN 源をベースにし、図3に示す第2世代 UCN 源を完成させた。主要部であるスパレーション中性子源と UCN を発生する水平配置型 He-II 容器、そして He-II を冷却する  $^3\text{He}$  冷凍器を完成させた。そして、30L の水平型 He-II 容器内で He-II を生成し、それを  $0.58\text{K}$  まで冷却することに成功した。そして、陽子ビーム電流  $10 \mu\text{A}$  に対応する He-II 内の熱負荷で、 $0.8\text{K}$  以下にできることを示した。この時、UCN 生成率はこれまでの値に較べて10倍となる。

完成した第2世代 UCN 源に陽子ビームを照射し、UCN を発生させることに成功した。図4に UCN 計数の結果を示す。0~150秒の間に陽子ビームが照射され、照射終了後 UCN バルブが開けられ、UCN が計数された。EDM 測定では、UCN を He-II 容器のアルミ箔窓を通して、真空中の UCN ガイドに取出し、常温の EDM 測定容器に導く。UCN がアルミに入射する時、核ポテンシャル (Fermi ポテンシャル) が障壁となる。アルミの Fermi ポテンシャルを磁気ポテンシャルで相殺するため、超伝導コイルを設置した。磁場オンオフで、UCN を計数することで、UCN 透過率が数倍に増大することを確認した。また、UCN スピン反転器と純鉄磁化フィルムを用いた UCN スピン解析器で、アルミ窓透過後の UCN 偏極率を測定した。UCN ガイドを通過する時、減偏極が生じるが、偏極保持磁場をかければ、偏極が保持され、図5に示すように70%以上の偏極が観測された。そして、第2世代 UCN 源は EDM 測定が行える状態となった。

第2世代 UCN 源の建設に並行して、UCN 制御バルブ、UCN 偏極装置、そして NMR による偏極制御技術等、EDM 測定に要する実験技術を開発した。まず、これまで測定されなかった He-II UCN 源からの UCN のエネルギー分布を現有の UCN 源を用いて測定した。次に、様々な素材に対する偏極緩和時間を測定した。つまり、EDM 容器内に幾つかの平板を挿入し、そこに偏極 UCN を導入し、減偏極の様子を UCN スピン反転器、そして UCN 偏極

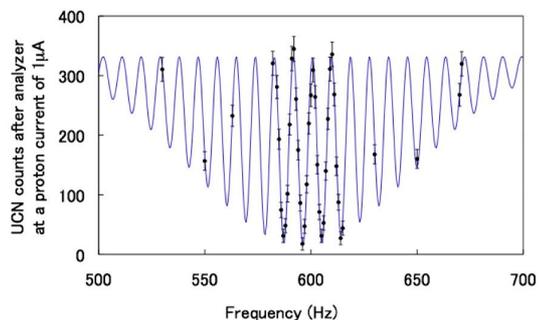


図6 Ramsey 共鳴の観測

と解析用の純鉄磁化フィルムを用いて観測した。シリカガラス、銅、そして DLC がよいとわかった。この結果に基づき素材を選定して EDM 容器を製作した。そこに偏極 UCN を導き、静磁場中で才差運動をさせ、才差角を検出した。つまり、図 6 に示すように Ramsey 共鳴を観測した。Ramsey 共鳴の振幅は ILL を超え、電場をかければ、EDM 測定ができる状態に到達した。これらの成果は、国際会議招待講演、一般講演で発表した。また、学術誌での出版を準備している。

EDM 測定では、電場を逆転した時の UCN スピン才差運動の位相シフトを測定する。EDM の測定精度を上げるには、磁場の安定性と一様性が重要となる。外場の影響を遮断するため、測定容器の周りに、4重の磁気シールドを設置した。測定容器と磁気シールド間の限られた空間に 10mG 程度の一様磁場を発生させるため、球面コイルを設置した。EDM 測定感度は、才差運動の時間に比例するが、磁場に非一様があると、才差運動の時間と共に偏極が崩れていくので、才差運動の時間が制限されてしまう。磁気遮蔽は長期的にみると、外場の変動に影響をうけ磁化してしまい、内部の磁場が変わってしまう。磁気遮蔽に消磁コイルを設置し消磁した結果、磁気遮蔽内の磁場の空間的な変動は、10 nT/m となり、ILL と同程度になった。外場の変動の影響をさらに、軽減するため、磁気遮蔽の周りに外場をキャンセルする 3次元コイルを設置した。

磁気遮蔽内の測定器の素材の微小磁化についても研究した。非磁性と言われているステンレス SUS316L でもわずかな磁化が存在している。これらの磁化は、電場逆転時に変化する可能性がある。EDM 容器内の磁場、つまり UCN が感じる磁場を正確にモニターする必要があると判明した。これに最適な方法は、原子の核スピン才差運動を用いることである。ILL では、 $^{199}\text{Hg}$  核スピン才差運動を用いていたが、 $10^{-27} e \text{ cm}$  の EDM 測定を行うには、幾何学的位相効果 (GPE) という、新たな問題が生じると判明した。

GPE とは、磁場をモニターする原子が、容器内の磁場勾配と電場の中を運動すると、スピン才差運動の周波数が電場に比例してシフトしてしまう現象のことである。この GPE が、これまでの ILL の EDM 測定での主な系統誤差である。次世代の EDM 測定では、これを解決する必要があるが、いまだ成功例はない。今回、 $^{129}\text{Xe}$  ガスを用いれば、バッファガス効果により GPE が減少することを見出した。EDM 測定時、高電圧をかけるが、 $^{129}\text{Xe}$  ガス中で放電が起こると致命的である。Xe ガスに高電圧をかけて、ガス圧を変えながら放電を調べた。使用圧力領域で放電はなかった。GPE は磁場勾配に比例するが、軸対称磁場の場合、UCN

と  $^{129}\text{Xe}$  磁気共鳴周波数比を用いれば、磁場勾配を減少させることができる。その結果、GPE は  $10^{-27} e \text{ cm}$  以下となり、革新的な EDM 測定が可能となる。このアイデアを PLA に出版した。

まとめ

1 第 2 世代 UCN 源が完成し、UCN 生成に成功した。

2 超伝導マグネットを用いた、He-II 容器からの UCN の取出しと UCN スピンの偏極に成功した。

3 EDM 測定に置ける基幹測定器を完成させ、Ramsey 共鳴の観測に成功した。

4 Ramsey 共鳴の感度を上げるため、外部磁場に対する磁気遮蔽と 3次元磁場補償コイルを完成させ、磁場の安定化と一様化に成功した。



図 7 He-II UCN 源を用いた EDM 測定装置

5 図 7 に示すように、新世代 He-II スパレーション UCN 源と EDM 測定装置は完成し、大阪大学核物理研究センターの 400MeV 陽子加速器が予定通り  $10\mu\text{A}$  の陽子ビームを出せれば、統計誤差  $10^{-26} e \text{ cm}$  をきる EDM 測定が行える状態となった。

$^{129}\text{Xe}$  磁束計の製作は、当初計画に含まれていなかったもので、磁束計完成のための予算を獲得する必要がある。

## 5 . 主な発表論文等

[雑誌論文](計 7件)

1 “Nuclear moments as a probe of electronic structure in material, exotic nuclear structure and fundamental symmetry”, K. Matsuta, T. Minamisono, M. Mihara, M. Fukuda, Shengyun Zhu, Y. Masuda, K. Hatanaka, Daqing Yuan, Yongnan Zheng, Yi Zuo, Ping Fang, Dongmei Zhou, T. Ohtsubo, T. Izumikawa, S. Momota, D. Nishimura, R. Matsumiya, A. Kitagawa, S. Sato, M. Kanazawa, M. Torikoshi, T. Nagatomo, Y. Nojiri, T. Suzuki, Xizhen Zhang, J. R.

Alonso, T. J. M. Symons, S. Kawasaki, S. C. Jeong, Y. Watanabe, K. Minamisono, other members of Osaka-CIAE-NIRS-Niigata-Kochi-LBL collaboration, Hyperfine Interactions 220 (2013) 21-28. Refereed.

2 “Creation of polarized ultracold neutrons and observation of Ramsey resonance for electric dipole moment measurement”, K. Matsuta, Y. Masuda, K. Hatanaka, S. C. Jeong, S. Kawasaki, R. Matsumiya, M. Mihara, Y. Watanabe, D. Nishimura, Y. Morita, K. Asahi, T. Adachi, J. Martin, A. Konaka, A. Miller, C. Bidinosti, T. Dawson, L. Lee, C. Davis, D. Ramsay, W. van Oers, E. Korkmaz, L. Buchman, Hyperfine Interactions 220 (2013) 89-93. Refereed.

3 “An EDM Measurement with a New Comagnetometer and a High Density UCN Source”, K. Matsuta, Y. Masuda, K. Hatanaka, S. Kawasaki, R. Matsumiya, M. Mihara, S.C. Jeong, Y. Watanabe, T. Adachi, D. Nishimura, K. Asahi, J.W. Martin, A. Konaka, A. Miller, C. Bidinosti, T. Dawson, L. Lee, C.A. Davis, W.D. Ramsay, W.T.H. van Oers, E. Korkmaz and L. Buchman, AIP Conf. Proc. 1560, (2013)152. Refereed.

4 “Spallation Ultracold Neutron Source of Superfluid Helium below 1 K”, Y. Masuda, K. Hatanaka, S.C. Jeong, S. Kawasaki, R. Matsumiya, K. Matsuta, M. Mihara, and Y. Watanabe, Phys. Rev. Lett. 108, 134801 (2012). Refereed.

5 “Neutron electric dipole moment measurement with a buffer gas comagnetometer”, Y. Masuda, K. Asahi, K. Hatanaka, S.C. Jeong, S. Kawasaki, R. Matsumiya, K. Matsuta, M. Mihara, Y. Watanabe, Phys. Lett. A376, 1347-1351(2012). Refereed.

6 “Spallation UCN production for nEDM”, Y. Masuda, K. Hatanaka, S.C. Jeong, S. Kawasaki, R. Matsumiya, K. Matsuta, M. Mihara, and Y. Watanabe, Physics Procedia 51, 89-92(2014). Refereed.

7 「電気双極子能率」、増田康博、素粒子物理ハンドブック、朝倉書店、430-435(2010) 査読あり

物理学会講演 8 件/年

国際会議招待講演: 23件

国際会議開催: International Workshop on “UCN and Fundamental Neutron Physics” UCN2010, RCNP, Japan, April 8\_9, 2010, <http://fnp.kek.jp/Japanese/workshop/2010/0408/index.html>

〔産業財産権〕  
取得状況(計 2 件)

名称: 希ガス封入用容器及び当該容器を用いた希ガス原子核の偏極方法

発明者: 増田康博

権利者: 高エネルギー加速器研究機構

種類:

番号: 4830116

取得年月日: 平 23 年 9 月 30 日

国内外の別: 国内

名称: Vessel for rare gas filling, and method for polarization of rare gas atomic nucleus using said vessel

発明者: Yasuhiro Masuda

権利者: High Energy Accelerator Research Organization

種類:

番号: US7737689B2

取得年月日: June 15, 2010

国内外の別: USA

ホームページ: 「超冷中性子を用いた時間反転不変性の検証」<http://fnp.kek.jp/>

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者 増田康博 (MASUDA Yasuhiro)  
高エネルギー加速器研究機構素粒子原子核研究所特別准教授

研究者番号: 60150009

(2) 研究分担者 鄭淳讚 (JEONG Sun Chang)  
高エネルギー加速器研究機構素粒子原子核研究所教授

研究者番号: 00262105

(3) 研究分担者 畑中吉治 (HATANAKA Kichiji)

大阪大学核物理研究センター教授

研究者番号: 40144530

(4) 研究分担者 松多健策 (MATSUTA Kensaku)

大阪大学理学研究科准教授

研究者番号: 50181722

(5) 研究分担者 渡部裕 (WATANABE Yutaka)  
高エネルギー加速器研究機構素粒子原子核研究所講師

研究者番号: 50353363

(6) 研究分担者 三原基嗣 (MIHARA Mototugu)

大阪大学理学研究科助教

研究者番号: 60294154